



Perbandingan Metode Aerodinamik, *Bowen Ratio* dan Penman-Monteith dalam Penentuan Evapotranspirasi Pertanaman Kelapa Sawit

Comparison of Aerodynamic, Bowen-Ratio, and Penman-Monteith Methods in Estimating Evapotranspiration of Oil Palm Plantation

Tania June^{1*}, Ni Wayan Srimani Puspa Dewi¹, Ana Meijide^{2,3}

¹Departemen Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor Gedung FMIPA Jl. Meranti Wing 19 Lv.4 Kampus IPB Dramaga Bogor 16680

²Bioclimatology, University of Gottingen

³Department of Crop Sciences, University of Gottingen

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 October 2017

Received in revised form 25 March 2018

Accepted 20 April 2018

doi: 10.29244/j.agromet.32.1.11-20

Keywords:

Aerodynamic

Bowen-Ratio

Evapotranspiration

Oil palm

Penman-Monteith

ABSTRACT

Oil palm is one important agricultural commodity that has high economic value. Oil palm productivity is significantly influenced by its water use (needs). Measurement and estimation of oil palm evapotranspiration is needed for determination of its water needs. Various methods are available and this study compare three methods, consisting of aerodynamic, Bowen-Ratio and Penman-Monteith methods in analyzing water needs/use of oil palms plantation located in PTPN VI Jambi. Peak of evapotranspiration rate occurred in the afternoon around 13.00 and 14.00 local time. Bowen-Ratio method has higher estimation value of evapotranspiration than the other two methods. Ratio between evapotranspiration and global radiation of two and ten-years old oil palm plantations remain similar, around 47%. Penman Monteith method has the nearest estimation value to reference method (aerodynamic method) showed by the smallest RMSE value, 0.087 for two years oil palm and 0.157 for ten-years old oil palm.

PENDAHULUAN

Kelapa sawit merupakan komoditas perkebunan penting yang mempunyai nilai ekonomis tinggi bagi Indonesia (Obidzinski et al., 2012), saat ini Indonesia merupakan negara produsen dan eksportir minyak kelapa sawit terbesar di dunia, diikuti oleh Malaysia dan Thailand (Khairunisa and Novianti, 2017). Pertumbuhan

Ketidakseimbangan ini terjadi karena pertanaman kelapa sawit mengalami defisit air yang menyebabkan pengurangan produksi kanopi (Hardwick et al., 2015; Meijide et al., 2017) dari pertanaman kelapa sawit yang disebabkan karena terjadinya proses kehilangan air dari tanaman yang disebut dengan evapotranspirasi.

Evapotranspirasi merupakan suatu komponen dari neraca air yang merupakan suatu proses

terutama curah hujan (Cock et al., 2016; Hoffmann et al., 2014; Pirker et al., 2016). Kelapa sawit akan tumbuh dan berkembang dengan baik pada wilayah dengan curah hujan sekitar 1700 – 3000 mm per tahun dengan distribusi curah hujan yang merata sepanjang tahun (Rahutomo et al., 2007). Jika Indonesia mulai memasuki musim kemarau, pertumbuhan dan perkembangan kelapa sawit akan terganggu karena neraca air dari pertanaman kelapa sawit menjadi tidak seimbang.

penggunaan lahan melalui evaporasi dari permukaan tanah dan transpirasi dari permukaan tanaman. Beberapa metode telah dikembangkan untuk mengetahui besarnya evapotranspirasi dari suatu penggunaan lahan seperti pendugaan dengan menggunakan rumus-rumus empirik (Allen et al., 1989; Feng et al., 2016; Gebler et al., 2015; Li et al., 2015; Shimizu et al., 2015). Pendugaan evapotranspirasi penting untuk dilakukan agar dapat dilakukan manajemen air terutama untuk menentukan kebutuhan air irigasi pada suatu lahan

* Corresponding author: tania.june@yahoo.com

sehingga keseimbangan air pada lahan tersebut tidak terganggu. Pada penelitian ini dilakukan pendugaan evapotranspirasi pada pertanaman kelapa sawit umur dua tahun di perkebunan kelapa sawit, Desa Pompa Air, Jambi dan kelapa sawit yang berumur sepuluh tahun di PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat dengan menggunakan tiga metode pendugaan, yaitu metode Penman-Monteith, Aerodinamik dan Bowen Ratio. Terdapat perbedaan kebutuhan data cuaca/iklim pada masing-masing metode sehingga penting dilakukan perbandingan antar ketiga metode dan melihat keeratan hubungan antar metode pendugaan evapotranspirasi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis evapotranspirasi pertanaman kelapa sawit umur dua tahun dan sepuluh tahun dan membandingkan nilai evapotranspirasi menggunakan metode Aerodinamik, Bowen-Ratio dan Penman-Monteith, serta menentukan *atmospheric driving force* terbesar terhadap proses evapotranspirasi pada tanaman kelapa sawit.

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Juni 2013 hingga Maret 2014. Penelitian ini diawali dengan pembuatan alat pengukuran di Balai Penelitian Klimatologi, Cimanggu, Bogor dan di Laboratorium Instrumentasi Departemen Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor. Pengambilan data dilakukan di dua lokasi, yaitu di perkebunan kelapa sawit, Desa Pompa Air, Jambi dan di PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat. Pengolahan dan analisis data pengukuran dilakukan di Laboratorium Agrometeorologi, Departemen Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor.

Bahan dan Alat

Peralatan yang diperlukan dalam penelitian di PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat adalah dua unit anemometer, dua unit sensor suhu dan kelembapan, enam sensor suhu tanah untuk dua kedalaman serta data logger, tiang besi, tali tambang untuk menara pengamatan, dan sensor tekanan udara.

Peralatan di lokasi Pompa Air Jambi disediakan oleh Project CRC990 yang bekerjasama dengan penelitian IPB dan Gottingen University. Peralatan yang dipasang di Jambi adalah pengukur kecepatan angin, suhu udara dan kelembapan udara pada ketinggian 2,4 m, 3,15 m, 4,14 m dan 5,8 m. Alat pengukur arah angin, radiasi gelombang panjang serta radiasi gelombang

pendek pada ketinggian 6,8 m, satu alat pengukur tekanan udara serta alat pengukur fluks panas tanah di permukaan tanah.

Data yang digunakan adalah: data suhu udara, kelembapan udara dan kecepatan angin pada ketinggian 9 m dan 13 m (lokasi penelitian di Cimulang, Jawa Barat) dan ketinggian 2,4 m, 3,15 m dan 5,80 m (lokasi penelitian di Pompa Air, Jambi); data fluks panas tanah (*ground heat flux*) di lokasi Pompa Air, Jambi; data lama penyinaran matahari untuk lokasi Pompa Air, Jambi; data tekanan udara di kedua lokasi penelitian; data radiasi global di lokasi Pompa Air, Jambi. Letak lintang dan bujur PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat, Perkebunan Kelapa Sawit, Desa Pompa Air, Jambi serta stasiun klimatologi Muara, Bogor.

Analisis Data

Evapotranspirasi pertanaman kelapa sawit pada penelitian ini diduga dengan menggunakan tiga metode, yaitu metode Penman-Monteith, aerodinamik dan Bowen ratio:

Metode Penman-Monteith

Metode ini menggunakan prinsip fisika dimana pertukaran energi dikaitkan dengan evapotranspirasi yang ditentukan dengan Persamaan (1) (Allen et al., 1998):

$$\lambda ET = \frac{(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (1)$$

keterangan:

- λET : fluks uap air ($\text{MJm}^{-2}\text{hari}^{-1}$),
- Δ : slope kurva tekanan uap ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$),
- R_n : radiasi netto ($\text{MJm}^{-2}\text{hari}^{-1}$),
- G : kerapatan fluks bahang tanah ($\text{MJm}^{-2}\text{hari}^{-1}$),
- ρ_a : massa jenis udara (kgm^{-3}),
- C_p : kapasitas panas spesifik udara pada tekanan konstan ($1013 \times 10^{-3} \text{ MJkg}^{-1}\text{C}^{-1}$),
- e_s : tekanan uap jenuh (kPa),
- e_a : tekanan uap aktual (kPa),
- r_a : tahanan aerodinamik (sm^{-1}),
- γ : konstanta psikometrik ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$),
- r_s : tahanan kanopi (sm^{-1}).

Nilai tahanan kanopi (r_s) menggunakan nilai tahanan kanopi antara hutan dan tanaman pertanian dengan nilai $(125+50)/2 = 87,5 \text{ sm}^{-1}$ (Oke, 2002). Radiasi netto (R_n) ditentukan dengan Persamaan (2) (Allen et al., 1998).

$$Rn = Rn_s - Rn_l \quad (2)$$

Dimana Rn_s radiasi gelombang pendek ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{hari}^{-1}$), Rn_l radiasi gelombang panjang ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{hari}^{-1}$).

Radiasi gelombang pendek di lokasi penelitian PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat ditentukan dengan Persamaan (3) (June, 2002).

$$R_s = \tau \times Sc \times \sin B \quad (3)$$

dimana τ adalah *atmospheric transmissivity* (0.433) (June, 2002), Sc adalah solar constant fluctuations, dan B adalah cosine of latitude x cosine of declination.

Radiasi netto gelombang pendek dan gelombang panjang pada perkebunan tanaman kelapa sawit di lokasi penelitian PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat ditentukan dengan Persamaan (4) dan (5) (Allen et al., 1998):

$$Rn_s = (1 - \alpha)R_s \quad (4)$$

$$Rn_l =$$

$$\sigma \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \quad (5)$$

dimana α albedo atau koefisien pantulan radiasi tajuk kelapa sawit yang bernilai 0,75 (Risdiyanto and Setiawan, 2007), σ konstanta Stefan Boltzam ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ.K}^{-4}.\text{m}^{-2}.\text{hari}^{-1}$), T_{\max} suhu absolut maksimum selama 24 jam (K), T_{\min} suhu absolut minimum selama 24 jam (K), R_s/R_{so} transmisivitas gelombang pendek yang bernilai 0.443 (June, 2002).

Penentuan radiasi gelombang panjang untuk lokasi penelitian perkebunan kelapa sawit, Desa Pompa Air, Jambi menggunakan rumus pada Persamaan (6) (Handoko, 1994).

$$Rn_l = \sigma T^4 (0.56 - 0.079e^{0.5}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \quad (6)$$

Dimana T suhu udara (K), e tekanan uap aktual (mb), n lama penyinaran (jam), dan N panjang hari (jam).

Tahanan aerodinamik ditentukan dengan menggunakan Persamaan (7) (Allen et al., 1998).

$$r_a = \frac{\left\{ \ln \left\{ \frac{(z-d)}{z_0} \right\}^2 \right\}}{k^2 u_z} \quad (7)$$

Dimana z tinggi pengukuran (m), d perpindahan bidang nol (m), z_0 panjang kekasapan (m), k konstanta von Karman (0.41), dan u_z kecepatan angin (m/s). Nilai d dan z_0 untuk kedua lokasi penelitian diperoleh dari analisa profil angin dengan nilai $d = 1.9 \text{ m}$ dan $z_0 = 0.0005 \text{ m}$ untuk lokasi Desa Pompa Air, Jambi. Sedangkan untuk lokasi Cimulang, Bogor nilai $d = 7.98 \text{ m}$ dan $z_0 = 0.52 \text{ m}$.

Metode Aerodinamik

Metode ini adalah metode pendugaan evapotranspirasi dengan mempertimbangkan stabilitas atmosfer dan turbulensi yang ditentukan dengan menggunakan Persamaan (8)-(12) (June, 2018):

$$\lambda ET = L \rho_a k^2 \frac{(u_2 - u_1)(q_2 - q_1)}{f \ln \left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d} \right) J^2 \varphi_m \varphi_s} \quad (8)$$

$$L = 2.50 \times 10^6 - 2400 T \quad (9)$$

$$q = \frac{0.622 e_a}{P - 0.378 e_a} \quad (10)$$

$$e_a = \frac{R H e_s}{100} \quad (11)$$

$$e_s = 6.1078 \exp \left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right) \quad (12)$$

Dimana ρ_a massa jenis udara (kgm^{-3}), u_2 kecepatan angin pada ketinggian 5.8 m (Jambi) dan 13 m (Cimulang) (ms^{-1}), u_1 kecepatan angin pada ketinggian 2.4 m (Jambi) dan 9 m (Cimulang) (ms^{-1}), q_2 kelembaban spesifik pada ketinggian 5.8 m (Jambi) dan 13 m (Cimulang) (kg.kg^{-1}), q_1 kelembaban spesifik pada ketinggian 2.4 m (Jambi) dan 9 m (Cimulang) (kg.kg^{-1}), z_2 ketinggian alat pada 5.8 m (Jambi) dan 13 m (Cimulang), z_1 ketinggian alat pada 2.4 m (Jambi) dan 9 m (Cimulang), φ_m *dimensionless wind shear factor*, φ_s *dimensionless scalar gradient factor*, L kalor penguapan bahang laten (J.kg^{-1}).

Penentuan kondisi stabilitas atmosfer menggunakan *Richardson number* (R_i) dengan Persamaan (13) dan (14).

$$R_i = \frac{g \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(z_2 - z_1)}}{\theta_a f \frac{(u_2 - u_1)}{(z_2 - z_1)} J^2} \quad (13)$$

$$\theta = T - \Gamma_d z \quad (14)$$

dimana R_i *Richardson number*, θ_a suhu potensial rata-rata pada ketinggian acuan z_a : $(z_1 z_2)^{1/2}$, g gaya gravitasi (9.8 ms^{-2}), θ_2 suhu potensial rata-rata pada ketinggian 5.8 m (Jambi) dan 13 m (Cimulang) (K), θ_1 suhu potensial rata-rata pada ketinggian 2.4 m (Jambi) dan 9 m (Cimulang) (K), dan Γ_d *dry adiabatic lapse rate* (-0.00976 Km^{-1}). Penentuan faktor koreksi $\varphi_m \varphi_s$ ditentukan berdasarkan hasil koreksi dari stabilitas atmosfer yang telah dihitung dengan menggunakan Persamaan (15)-(19).

$$\zeta = R_i \quad \text{pada kondisi } R_i < 0 \quad (15)$$

$$\zeta = \frac{R_i}{(1 - 5R_i)} \quad \text{pada kondisi } 0 < R_i < 0.1 \quad (16)$$

$$\zeta = 0.2 \quad \text{pada kondisi } 0.1 < R_i \quad (17)$$

$$\varphi_s = \varphi_m^2 = (1 - 15\zeta)^{-1/2} \quad \text{jika } R_i < 0 \quad (18)$$

$$\varphi_s = \varphi_m = (1 + 5\zeta) \quad \text{jika } R_i > 0 \quad (19)$$

Metode Bowen Ratio

Metode ini merupakan suatu metode pendugaan evapotranspirasi berdasarkan pada keseimbangan energi yang ditentukan dengan menggunakan Persamaan (20) dan (21) (Amarakoon et al., 2000; Foken, 2008).

$$\lambda ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (20)$$

$$\beta = \gamma \frac{dT}{de_a} \quad (21)$$

dimana β nisbah bowen, dT perbedaan suhu antara dua ketinggian ($^{\circ}\text{C}$), dan de_a perbedaan tekanan uap aktual pada dua ketinggian (kPa).

Keeratan Hubungan Antar Metode

Perbandingan antar model dilakukan dengan menghitung nilai RMSE (*Root Mean Square Error*, Persamaan (22)) untuk menduga rata-rata kesalahan (Bennett et al., 2013; Willmott, 1982). Metode pendugaan yang dijadikan acuan adalah metode aerodinamik karena diantara ketiga metode, semua data yang diperlukan dalam perhitungan metode aerodinamik menggunakan data pengukuran langsung. Sedangkan beberapa data yang digunakan dalam metode Bowen-Ratio dan Penman-Monteith merupakan data estimasi karena keterbatasan data yang tersedia.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (22)$$

P_i dan O_i merupakan nilai model dan observasi evapotranspirasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Suhu Udara

Profil suhu udara diurnal wilayah perkebunan kelapa sawit, Desa Pompa Air, Jambi merupakan profil suhu pada ketinggian 2.40 m, 3.15 m dan 5.80 m. Sedangkan profil suhu di wilayah PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat merupakan profil suhu pada ketinggian 9 m dan 13 m. Secara umum pada lapisan troposfer suhu udara akan menurun dengan meningkatnya ketinggian (*lapse rate*).

Suhu udara maksimum di wilayah Desa Pompa Air terjadi pada pukul 14:00 WIB sebesar 32.13°C serta suhu minimum sebesar 22.92°C pada pukul 07:00 WIB. Sedangkan di wilayah Cimulang suhu udara maksimum terjadi pukul 12:00 WIB dengan nilai 31.7°C dan suhu terendah sebesar 24.58°C pada pukul 18:00 WIB. Berdasarkan data suhu udara maksimum kedua wilayah penelitian terlihat bahwa suhu menurun dengan bertambahnya ketinggian. Berdasarkan teori, pada siang hari kerapatan udara dekat permukaan lebih tinggi dibandingkan lapisan di atasnya dan lebih banyak menerima pantulan radiasi dari permukaan bumi sehingga suhu udara dekat permukaan lebih tinggi daripada lapisan udara di atasnya.

Kelembapan Udara

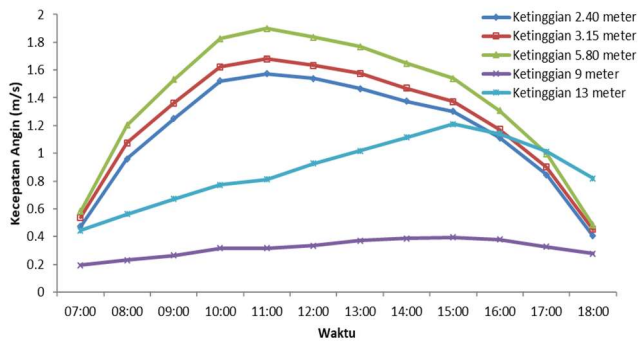
Pola kelembapan relatif di kedua wilayah penelitian memiliki pola yang berbanding terbalik dengan pola suhu udara. Pada siang hari kelembapan relatif rendah dan pada malam atau pagi hari kelembapan relatif tinggi. Kelembapan relatif maksimum di wilayah Desa Pompa Air terjadi pada pukul 07:00 WIB dengan nilai 97.87% serta kelembapan relatif minimum terjadi pukul 14:00 WIB 59.96%. Sedangkan untuk wilayah Cimulang kelembapan relatif maksimum terjadi pada pukul 18:00 WIB dengan nilai 82.82% dan kelembapan relatif minimum terjadi pukul 12:00 WIB dengan nilai 55.86%.

Kecepatan Angin

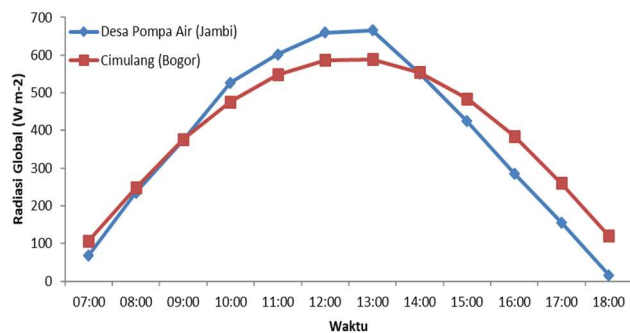
Profil kecepatan angin di wilayah perkebunan kelapa sawit, Desa Pompa Air di tiga ketinggian dan di Cimulang di dua ketinggian memiliki variasi diurnal yang hampir sama. Kecepatan angin maksimum di wilayah Desa Pompa Air, Jambi terjadi pukul 11:00 WIB dengan nilai 1.72 ms^{-1} . Sedangkan kecepatan angin minimum terjadi pada pukul 18:00 WIB sebesar 0.45 ms^{-1} . Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa kecepatan angin maksimum di wilayah Cimulang terjadi pukul 15:00 WIB dengan 0.80 ms^{-1} serta kecepatan angin minimum pada pukul 07:00 WIB (0.31 m.s^{-1}). Kecepatan angin meningkat dengan pertambahan ketinggian (Gambar 1) karena semakin keatas gaya gesekan semakin kecil sehingga kecepatan angin lebih tinggi dibandingkan lapisan dibawahnya.

Radiasi Global

Radiasi global di wilayah Desa Pompa Air, Jambi dan wilayah Cimulang, Jawa Barat memiliki pola yang hampir sama. Puncak radiasi terjadi pada waktu siang hari dan radiasi minimum terjadi pagi atau sore hari. Radiasi global pada Gambar 2 merupakan radiasi sesaat yang diterima oleh permukaan bumi pada waktu pengamatan.



Gambar 1 Profil kecepatan angin wilayah perkebunan kelapa sawit, Desa Pompa Air dan di PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang



Gambar 2 Radiasi global wilayah perkebunan kelapa sawit, Desa Pompa Air, Jambi dan PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat

Radiasi maksimum di wilayah Desa Pompa Air, Jambi sebesar 665.96 Wm^{-2} pada pukul 13:00 WIB serta radiasi minimum terjadi pada pukul 18:00 WIB sebesar 15.62 Wm^{-2} dan untuk wilayah Cimulang, Jawa Barat radiasi maksimum terjadi pada pukul 13:00 WIB sebesar 588.48 Wm^{-2} serta radiasi minimum sebesar 107.34 Wm^{-2} terjadi pukul 07:00 WIB. Besarnya radiasi surya juga dipengaruhi oleh keadaan atmosfer suatu wilayah seperti penutupan awan. Semakin besar penutupan awan pada suatu wilayah, semakin kecil radiasi surya yang diterima oleh permukaan bumi.

Evapotranspirasi Pertanian Kelapa Sawit Menggunakan Metode Aerodinamik, Bowen-Ratio dan Penman Monteith

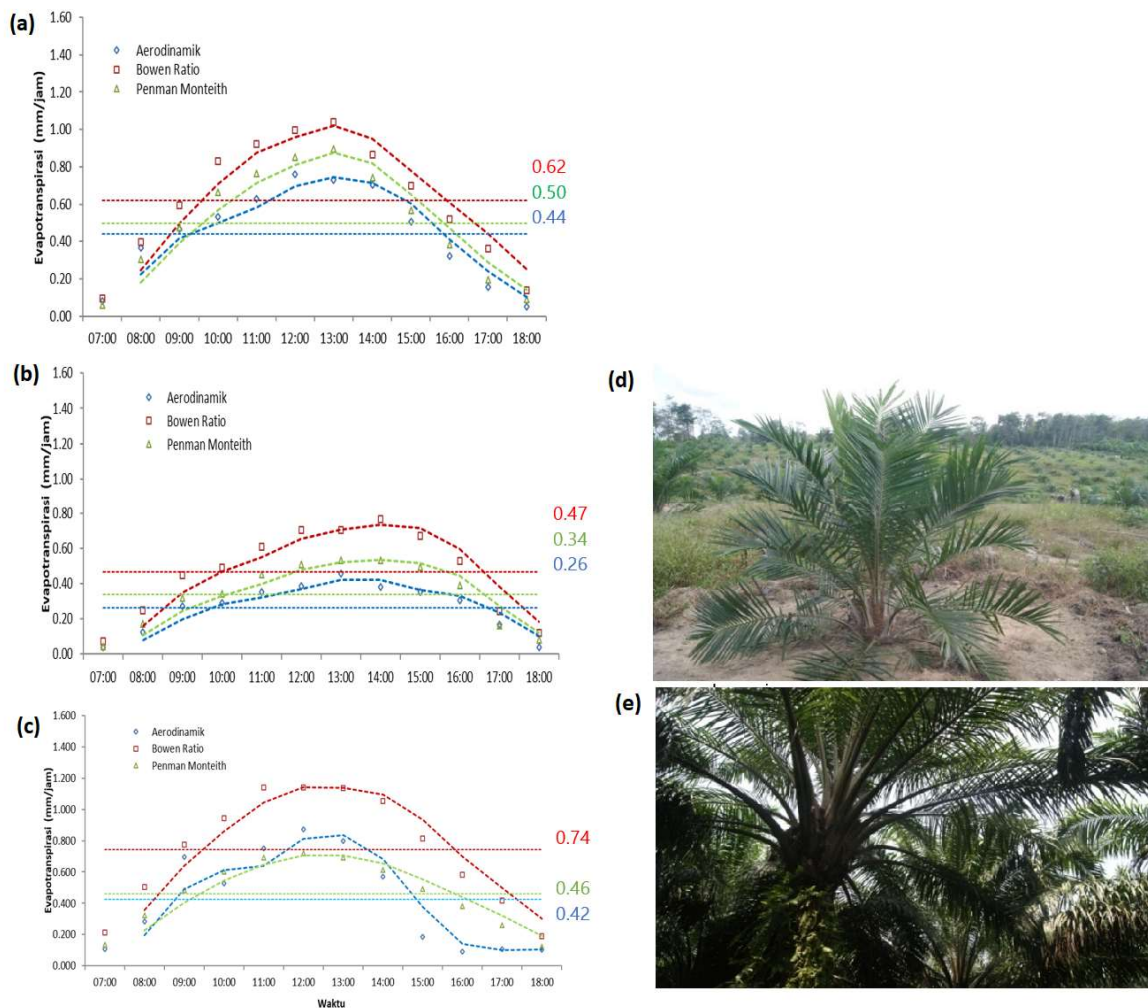
Hasil pendugaan evapotranspirasi pertanian kelapa sawit umur dua tahun dan sepuluh tahun menggunakan metode Aerodinamik, Bowen-Ratio dan Penman-Monteith pada penelitian ini merupakan evapotranspirasi setiap jam (diurnal) pada pukul 07:00 WIB sampai 18:00 WIB. Nilai evapotranspirasi diurnal ini merupakan rata-rata dari nilai evapotranspirasi pada jam yang sama selama periode pengukuran. Evapotranspirasi pada malam hari pada penelitian ini diabaikan karena tidak ada radiasi matahari pada malam hari sehingga ketersediaan energi rendah dan evapotranspirasi diasumsikan nol (Sumner and Jacobs, 2005). Untuk lokasi penelitian di Desa Pompa Air, Jambi, terdapat dua hasil pendugaan evapotranspirasi, yaitu evapotranspirasi yang hanya menggunakan data kecepatan angin yang berasal dari arah Barat (memenuhi persyaratan *fetch*) dan data yang kecepatan anginnya berasal dari semua arah. Namun, untuk analisis lebih lanjut digunakan hasil yang mengikuti persyaratan *fetch* agar diperoleh hasil pendugaan evapotranspirasi kelapa sawit yang tidak dipengaruhi oleh faktor hutan yang berada di sekitar perkebunan kelapa sawit di Desa Pompa Air, Jambi.

Ketiga metode pendugaan evapotranspirasi menunjukkan pola evapotranspirasi harian yang hampir sama dari masing-masing periode waktu. Waktu puncak terjadinya evapotranspirasi sekitar pukul 12:00 WIB sampai pukul 13:00 WIB. Fenomena ini hampir sama dengan penelitian yang dilakukan oleh (Li et al., 2008), yang memperoleh evapotranspirasi maksimum pada pukul 13:00 WS dan 14:00 WS pada setiap fase tanaman. Menurut (Rakhecha and Singh, 2009), penguapan sangat bergantung dari ketersediaan energi panas yang sumber utamanya adalah matahari (Gambar 3a-e).

Tabel 1 Nilai evapotranspirasi harian, bulanan dan tahunan pertanian kelapa sawit di Desa Pompa Air, Jambi dan Cimulang, Jawa Barat

Metode	Pompa Air, Jambi (umur 2 tahun)						Cimulang, Bogor (umur 10 tahun)		
	Dengan mempertimbangkan Fetch			Tanpa mempertimbangkan Fetch					
	mm/hari	mm/bulan	mm/tahun*	mm/hari	mm/bulan	mm/tahun*	mm/hari	mm/bulan	mm/tahun*
Aerodinamik	3.20	96	1168	5.30	159	1935	5.10	153	1862
Bowen-Ratio	5.60	168	2044	7.40	222	2701	8.90	267	3249
Penman-Monteith	4.00	120	1460	6.00	180	2190	5.50	165	2008
Rata-rata	4.27	128	1557	6.23	187	2275	6.50	195	2373

*dihitung dari nilai rata-rata harian



Gambar 3 Evapotranspirasi pertanian kelapa sawit: (a) umur dua tahun Desa Pompa Air, Jambi (tanpa mempertimbangkan persyaratan *fetch*), (b) sawit umur dua tahun Desa Pompa Air, Jambi (dengan mempertimbangkan persyaratan *fetch*), (c) sawit umur sepuluh tahun di PT Perkebunan Nusantara VIII, Kebun Cimulang, Jawa Barat (dengan mempertimbangkan persyaratan *fetch*). Tanaman kelapa sawit pada umur dua tahun di Desa Pompa Air (d), dan sawit umur sepuluh tahun di PT Perkebunan Nusantara VIII (e)

Hasil pendugaan dengan menggunakan tiga metode menunjukkan bahwa metode Bowen-Ratio cenderung menunjukkan nilai evapotranspirasi yang lebih tinggi daripada metode Penman-Monteith dan aerodinamik pada kedua umur pertanian kelapa sawit (lihat nilai akumulasi pada Tabel 1) karena pada metode ini diasumsikan tidak ada adveksi energi secara horizontal. Selain itu metode ini didasarkan pada keseimbangan energi tertutup sehingga nilai storage atau simpanan energi diabaikan (Foken, 2008).

Tabel 2 menunjukkan bahwa persentase ET/Rs kedua umur tanaman kelapa sawit memiliki nilai yang sama, 47 %. Menurut Allen et al. (1998), jika tanaman masih kecil, kehilangan air cenderung lebih besar dari permukaan tanah. Sedangkan, jika suatu kanopi tanaman telah menutupi permukaan tanah, maka transpirasi merupakan proses utama. Berdasarkan teori ini bisa dikatakan bahwa saat tanaman kelapa sawit masih kecil, evapotranspirasi dominan dari penguapan permukaan tanah karena hanya sebagian kecil

permukaan tanah yang tertutupi kanopi kelapa sawit. Sedangkan setelah kelapa sawit dewasa, kanopi tanaman kelapa sawit hampir menutupi semua bagian permukaan tanah sehingga evapotranspirasi dominan dari transpirasi tanaman kelapa sawit. Untuk wilayah Jambi, Meijide et al. (2017) menemukan bahwa untuk tanaman dewasa energi yang digunakan untuk evapotranspirasi adalah 78 % dari R_n pada siang hari, disebabkan karena suhu udara dan VPD yang lebih tinggi di Jambi.

Tabel 2 Persentase penggunaan radiasi global untuk evapotranspirasi

Umur Tanaman (tahun)	R_s (Wm^{-2})	ET (Wm^{-2})	ET/Rs (%)
2	260.79	121.96	47
10	394.70	185.84	47

Atmospheric Driving Forces Evapotranspirasi Pertanian Kelapa Sawit

Evapotranspirasi dipengaruhi oleh beberapa faktor cuaca/iklim seperti suhu udara, kelembaban relatif, radiasi matahari dan kecepatan angin. Faktor cuaca/iklim yang mendorong proses evapotranspirasi (*atmospheric driving forces*) pertanian kelapa sawit umur dua tahun dan sepuluh tahun ditentukan berdasarkan nilai korelasi antara parameter cuaca dengan nilai rerata hasil pendugaan evapotranspirasi dari metode Aerodinamik, Bowen-Ratio dan Penman-Monteith.

Tabel 3 menunjukkan nilai korelasi antara parameter cuaca dengan nilai evapotranspirasi pertanian kelapa sawit umur dua tahun dan sepuluh tahun. Terlihat bahwa gradien suhu udara memiliki korelasi yang paling tinggi dengan evapotranspirasi pertanian kelapa sawit umur dua tahun, sedangkan pada pertanian kelapa sawit umur sepuluh tahun korelasi yang paling kuat ditunjukkan oleh hubungan radiasi global dengan evapotranspirasi. Nilai evapotranspirasi sangat dipengaruhi oleh energi panas yang dominan berasal dari radiasi surya sehingga radiasi surya sangat mempengaruhi besarnya evapotranspirasi suatu lahan. Apabila suhu udara meningkat, maka nilai evapotranspirasi akan meningkat sedangkan jika kelembaban relatif meningkat maka evapotranspirasi menurun.

Tabel 3 Nilai korelasi hubungan parameter cuaca dengan nilai evapotranspirasi

Parameter	Korelasi	
	Jambi	Cimulang
dT	0.98	0.93
dRH	0.76	0.57
U rata-rata	0.95	0.31
Rs	0.95	0.94

Kecepatan angin, gradien kelembaban udara antar ketinggian dan radiasi global pada pertanian kelapa sawit umur dua tahun di lokasi penelitian Desa Pompa Air, Jambi juga menunjukkan korelasi yang kuat dengan evapotranspirasi. Angin merupakan faktor penggerak uap air atau berperan dalam pemindahan uap air. Kecepatan angin yang tinggi di atas permukaan akan mengakibatkan penguapan meningkat (Rakhecha and Singh, 2009). Kelembaban relatif yang tinggi menunjukkan kapasitas udara untuk menyimpan uap air kecil sehingga penguapan dari suatu permukaan lahan kecil (Rakhecha and Singh, 2009). Namun, hal yang berbeda terjadi pada pertanian kelapa sawit umur sepuluh tahun di lokasi penelitian Cimulang, Jawa Barat. Kecepatan angin memiliki korelasi yang lemah dengan evapotranspirasi yang ditunjukkan dengan nilai

korelasi yang kecil karena anemometer pada ketinggian 9 m masih berada pada *roughness sublayer* dan belum memasuki *inertial sublayer* sehingga masih dipengaruhi oleh struktur kanopi pertanian kelapa sawit. Selain itu, rendahnya nilai korelasi antara unsur-unsur cuaca dengan nilai evapotranspirasi bisa disebabkan oleh kurang cermatnya pengamatan (Manik et al., 2012).

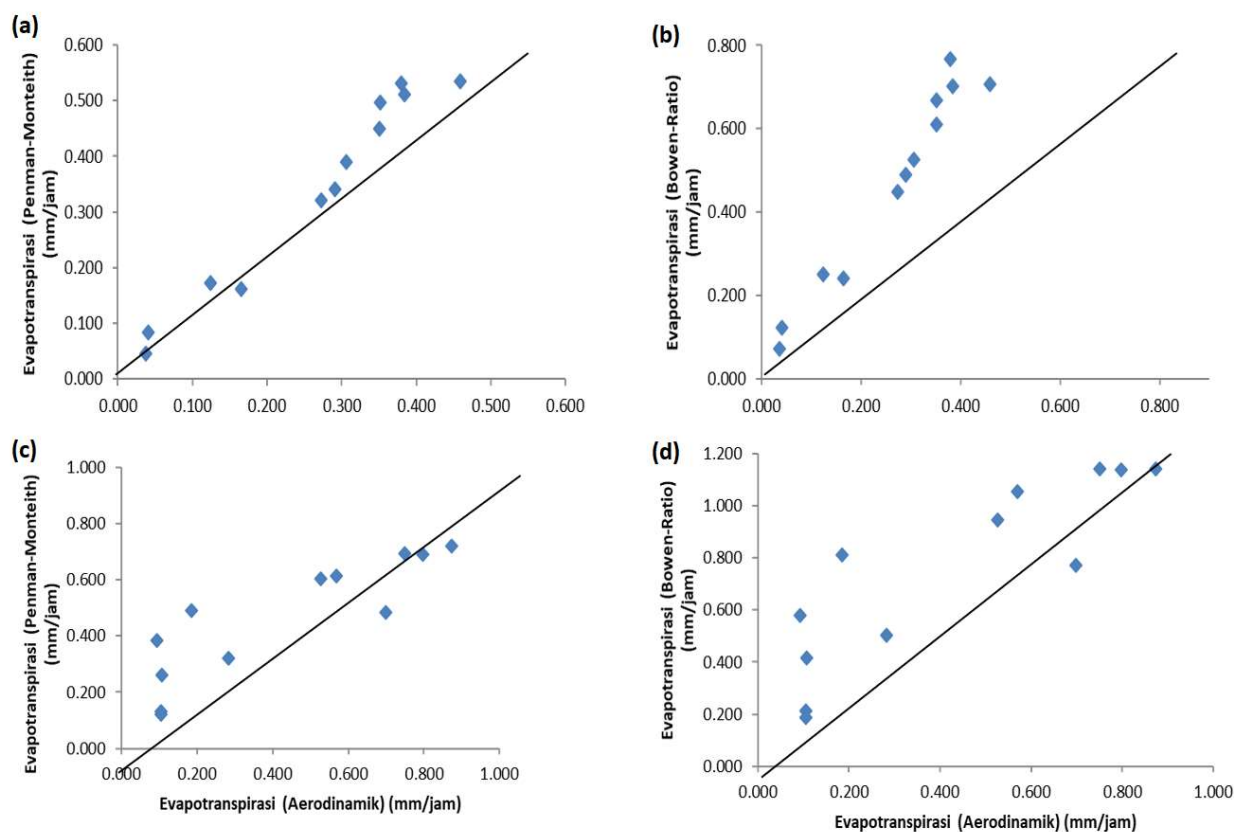
Keeratan Hubungan antara Metode Aerodinamik, Metode Bowen-Ratio dan Metode Penman-Monteith

Metode Aerodinamik, Bowen-Ratio dan Penman-Monteith dibandingkan dengan melihat korelasi dan *Root Mean Square Error*. (Willmott, 1982) merekomendasikan RMSE untuk menduga rata-rata kesalahan. Metode pendugaan evapotranspirasi acuan yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode aerodinamik. Metode aerodinamik digunakan sebagai acuan karena semua data yang digunakan dalam perhitungannya merupakan data pengukuran langsung di lapangan.

Tabel 4 Nilai RMSE perbandingan antar model pendugaan evapotranspirasi pada kelapa sawit umur 2 dan 10 tahun

Acuan dan Model	RMSE	
	2 tahun	10 tahun
Aerodinamik dan Bowen-Ratio	0.229	0.360
Aerodinamik dan Penman-Monteith	0.087	0.157

Berdasarkan RMSE antar metode pendugaan evapotranspirasi diperoleh nilai RMSE terendah antara metode aerodinamik dengan metode Penman-Monteith pada kedua umur pertanian kelapa sawit (Tabel 4). Semakin rendah nilai RMSE menunjukkan semakin baiknya keeratan antara dua metode yang dibandingkan atau makin baiknya kesesuaian antara dua nilai rata-rata yang dibandingkan (Manik et al., 2012). Hal ini menunjukkan bahwa metode Penman-Monteith merupakan metode yang nilai estimasinya paling mendekati nilai evapotranspirasi acuan (aerodinamik) daripada metode Bowen-Ratio. Selain itu berdasarkan grafik garis 1:1 (Gambar 10) menunjukkan bahwa nilai estimasi menggunakan metode Penman-Monteith dan Bowen-Ratio cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan metode acuan (aerodinamik) dengan perbedaan nilai yang lebih tinggi ditunjukkan oleh garis 1:1 antara metode aerodinamik dengan Bowen-ratio pada pertanian kelapa sawit umur dua tahun dan sepuluh tahun.



Gambar 10 Grafik Garis 1:1 Evapotranspirasi Metode: (a) Penman-Monteith dengan Aerodinamik (Jambi); (b) Bowen-Ratio dengan Aerodinamik (Jambi); (c) Penman-Monteith dengan Aerodinamik (Cimulang); dan (d) Bowen-Ratio dengan Aerodinamik (Cimulang).

KESIMPULAN

Pendugaan evapotranspirasi dengan menggunakan metode Aerodinamik, Penman-Monteith dan Bowen-Ratio memiliki variasi pola diurnal yang sama pada kedua umur pertanaman kelapa sawit. Puncak evapotranspirasi terjadi pada siang hari, sekitar jam 13.00-14.00 WIB dan evapotranspirasi terendah terjadi pada pagi dan sore hari. Metode Bowen-Ratio memiliki nilai pendugaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode aerodinamik dan metode Penman-Monteith. Nilai evapotranspirasi harian pertanaman kelapa sawit umur dua tahun sebesar 3.2 mm/hari (aerodinamik), 5.6 mm/hari (Bowen-Ratio) dan 4.0 mm/hari (Penman-Monteith). Sedangkan pada pertanaman kelapa sawit umur sepuluh tahun nilai evapotranspirasi sebesar 5.1 mm/hari (aerodinamik), 8.9 mm/hari (Bowen-Ratio) dan 5.5 mm/hari (Penman-Monteith). *Atmospheric Driving Force* terbesar terhadap proses evapotranspirasi ada dua umur tanaman ini adalah gradien suhu dan radiasi global. Hasil pendugaan metode Penman-Monteith memiliki nilai pendugaan yang paling mendekati metode acuan (aerodinamik) yang ditunjukkan dengan nilai RMSE yang paling kecil sebesar 0.087 pada pertanaman

kelapa sawit umur dua tahun dan 0.157 pada pertanaman kelapa sawit umur sepuluh tahun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini memperoleh dana ABS 2014 dan menggunakan fasilitas dari *Collaborative Research Centre* (CRC) 990: EForTS (Sumatra, Indonesia).

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., Burman, R.D., 1989. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agronomy Journal* 81, 650–662. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100040019x>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Amarakoon, D., Chen, A., McLean, P., 2000. Estimating daytime latent heat flux and evapotranspiration in Jamaica. *Agricultural and Forest Meteorology* 102, 113–124. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00105-2)

- Bennett, N.D., Croke, B.F.W., Guariso, G., Guillaume, J.H.A., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T.H., Norton, J.P., Perrin, C., Pierce, S.A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A.A., Fath, B.D., Andreassian, V., 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software* 40, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>
- Cock, J., Kam, S.P., Cook, S., Donough, C., Lim, Y.L., Jines-Leon, A., Lim, C.H., Pramananda, S., Yen, B.T., Mohanaraj, S.N., Samosir, Y.M.S., Oberthür, T., 2016. Learning from commercial crop performance: Oil palm yield response to management under well-defined growing conditions. *Agricultural Systems* 149, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.002>
- Feng, Y., Cui, N., Zhao, L., Hu, X., Gong, D., 2016. Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China. *Journal of Hydrology* 536, 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.053>
- Foken, T., 2008. *Micrometeorology*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gebler, S., Hendricks Franssen, H.-J., Pütz, T., Post, H., Schmidt, M., Vereecken, H., 2015. Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: a comparison with eddy covariance and tipping bucket. *Hydrology and Earth System Sciences* 19, 2145–2161. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2145-2015>
- Handoko, 1994. *Dasar Penyusunan dan Aplikasi Model Simulasi Komputer untuk Pertanian*. Jurusan Geofisika dan Meteorologi, FMIPA-IPB, Bogor.
- Hardwick, S.R., Toumi, R., Pfeifer, M., Turner, E.C., Nilus, R., Ewers, R.M., 2015. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology* 201, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.010>
- Hoffmann, M.P., Castaneda Vera, A., van Wijk, M.T., Giller, K.E., Oberthür, T., Donough, C., Whitbread, A.M., 2014. Simulating potential growth and yield of oil palm (*Elaeis guineensis*) with PALMSIM: Model description, evaluation and application. *Agricultural Systems* 131, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.07.006>
- June, T., 2018. *Modul Praktikum Mikrometeorologi: Pengukuran Profil Iklim Mikro, Fluks Momentum, Fluks Bahang dan Fluks Uap Air dari Permukaan Kanopi Tanaman*. IPB, Bogor.
- June, T., 2002. *Environment effects on photosynthesis of C3 plants: scaling up from electron transport to the canopy (Study case: Glycine max. L. Merr)* (PhD Thesis). The Australian National University, Canberra.
- Khairunisa, G., Novianti, T., 2017. Daya saing minyak sawit dan dampak renewable energy directive (RED) Uni Eropa terhadap ekspor Indonesia di pasar Uni Eropa. *Jurnal Agribisnis Indonesia* 5, 103–116.
- Li, S., Kang, S., Li, F., Zhang, L., 2008. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China. *Agricultural Water Management* 95, 1214–1222. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.014>
- Li, S., Zhang, L., Kang, S., Tong, L., Du, T., Hao, X., Zhao, P., 2015. Comparison of several surface resistance models for estimating crop evapotranspiration over the entire growing season in arid regions. *Agricultural and Forest Meteorology* 208, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.002>
- Manik, T., Rosadi, R., Karyanto, A., 2012. Evaluasi Metode Penman-Monteith dalam Menduga Laju Evapotranspirasi Standar (ET₀) di Dataran Rendah Propinsi Lampung, Indonesi. *JTEP Jurnal Keteknikan Pertanian* 26, 121–128.
- Meijide, A., Röhl, A., Fan, Y., Herbst, M., Niu, F., Tiedemann, F., June, T., Rauf, A., Hölscher, D., Knohl, A., 2017. Controls of water and energy fluxes in oil palm plantations: Environmental variables and oil palm age. *Agricultural and Forest Meteorology* 239, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.034>
- Obidzinski, K., Andriani, R., Komarudin, H., Andrianto, A., 2012. Environmental and Social Impacts of Oil Palm Plantations and their Implications for Biofuel Production in Indonesia. *Ecology and Society* 17.
- Oke, T., 2002. *Boundary Layer Climates*, Second Edition, 2nd ed. Taylor and Francis Group.
- Pirker, J., Mosnier, A., Kraxner, F., Havlík, P., Obersteiner, M., 2016. What are the limits to oil palm expansion? *Global Environmental Change* 40, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.007>

- Rahutomo, S., Siregar, H., Sutarta, E., 2007. Irigasi pada perkebunan kelapa sawit: sebuah tinjauan. *Warta PPKS* 15, 7–18.
- Rakhecha, P., Singh, V., 2009. *Applied Hydrometeorology*. Springer, India.
- Risdiyanto, I., Setiawan, R., 2007. Metode neraca energi untuk perhitungan indeks luas daun menggunakan data citra satelit multispektral. *J. Agromet Indonesia* 21, 27–38.
- Shimizu, T., Kumagai, T., Kobayashi, M., Tamai, K., Iida, S., Kabeya, N., Ikawa, R., Tateishi, M., Miyazawa, Y., Shimizu, A., 2015. Estimation of annual forest evapotranspiration from a coniferous plantation watershed in Japan (2): Comparison of eddy covariance, water budget and sap-flow plus interception loss. *Journal of Hydrology* 522, 250–264. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.021>
- Sumner, D.M., Jacobs, J.M., 2005. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 308, 81–104. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.023>
- Willmott, C.J., 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 63, 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)